

UPS시스템의 병렬운전 제어기법

이상훈, 이우철*, 김경환, 현동석
한양대학교, 한경대학교*

The Parallel Operation Control Technique of UPS System

Sang-Hoon Lee, Woo-Cheol Lee*, Kyong-Hwan Kim, Dong-Seok Hyun

Dep. of Electrical Engineering, Hanyang Univ.

Dep. of Electrical Engineering, Hankyong National Univ.*

ABSTRACT

The parallel operation system of multiple UPS(Uninterruptible Power Supply) is used to increase power capacity of the system or to secure higher reliability at critical loads. In the parallel operation of the two UPSs, the load sharing control to maintain the current balance between them is a matter of consequence.

In this paper, a highly precise load sharing controller is proposed and implemented for the parallel operation system of two UPSs. After that, a good performance of the proposed method is verified by simulation in the parallel operation system with two UPSs.

1. 서 론

최근 고도의 정보화 및 산업화 사회의 발전과 더불어, 중요한 데이터를 처리하는 컴퓨터나 의료장비, 각종 데이터 처리 시스템(OA/FA system)과 같은 민감한 부하는 전원 전압의 변동에 있어서 매우 민감하다. 또, 과전압이나 저전압과 같은 전압 변동뿐만 아니라, 고조파와 일시적인 과도 현상에도 큰 영향을 받는다. 이러한 영향으로 시스템이 정지 및 오 동작을 하고 데이터를 파괴시키는 결과를 초래하기도 한다. 즉, 이런 민감한 부하가 안정적으로 동작할 수 있도록 전력의 질에 대한 관심이 높아지고 있다. 이들의 대한 대책으로써 안정된 전력을 공급하고 신뢰성을 높이기 위한 대책으로 UPS의 사용이 필수적이다.^[1]

더욱이, 전체 시스템의 용량증대와 부하의 중요도에 따른 신뢰성을 증가시키기 위하여 UPS의 병렬 운전이 사용된다.^{[2]-[3]} UPS 병렬 운전시 가장 중요한 점은 각

UPS간의 부하 분담이다. 다시 말해서, 부하 전류를 각 UPS가 균등하게 분담하는 것이다. 정확한 부하 분담을 위해서는 각 UPS의 출력 전압이 주파수, 위상, 크기에 있어서 정확히 동기화 되어야 한다. 이상적으로, 각 UPS의 출력 전류가 동일하다고 간주할 수 있지만, 실제로는 각 UPS의 라인 임피던스가 서로 다르고, 위상을 동기화 시켜도 라인 임피던스 및 각 UPS간의 특성 차이로 인해 순환 전류가 흐르게 된다. 이러한 순환 전류로 인해 UPS는 쉽게 과부하 조건에 도달하고, 원래의 정격 용량보다 작은 용량을 공급하게 되어 전체 효율이 감소하는 결과를 초래한다. 또한, 과도한 순환 전류는 UPS내의 반도체 소자들을 파괴 시키기도 한다.^[4]

이 논문에서는 위에서 언급한 문제점을 해결하기 위해서 새로운 전류 분담 제어 기법이 제안되었다. Master UPS는 출력 전압 제어를 담당하고, 병렬 운전을 위해 추가되는 Slave UPS는 전류 제어를 담당한다. 만약, Slave UPS도 Master UPS처럼 전압을 제어할 경우, 각 UPS간의 출력 전압의 크기와 위상에 의해 순환 전류가 발생한다. 하지만, Slave UPS가 전류 제어만을 하게 되면, 순환 전류의 문제점을 해결할 수 있고, 병렬 운전을 위해 연결되는 UPS 전체 대수의 1/n만큼만 담당하면 된다. 따라서, 제어기의 설계가 간단하고, 강인성을 갖는다. 다만, Master UPS가 고장나면 Slave UPS는 전류 제어 모드에서 전압 제어 모드로 전환하여 출력 전압을 제어하게 된다.

2. 병렬 UPS 회로해석

병렬로 연결된 UPS의 출력 전압 사이의 크기와 위상 차에 따른 부하 분담 해석을 위하여, 상당 등가 회로를 그림 1에 나타내었다. UPS1과 UPS2의 출력 전압/전류를 각각 $\hat{V}_1, \hat{V}_2, \hat{I}_1, \hat{I}_2$ 로 정의할 수 있다. 또, UPS의 출력 필터와 부하 임피던스를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{V}_1 = V_1 \angle \phi_1, \vec{V}_2 = V_2 \angle \phi_2, \vec{V}_o = V_o \angle 0 \quad (1)$$

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_3 = R + j\omega L$$

$$\dot{Z}_2 = \dot{Z}_4 = \frac{1}{j\omega C} \quad (2)$$

$$\dot{Z}_o = R_o + j\omega L_o$$

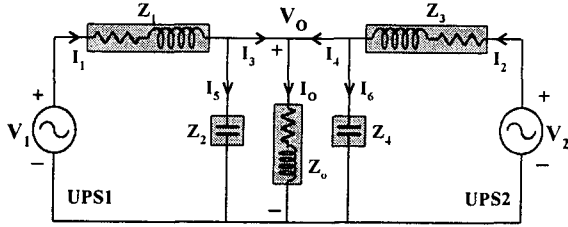


그림 1 상당등가회로
Fig. 1 Per-phase equivalent circuit

그림 1로부터 기본 회로 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_o}{\dot{Z}_1}, \dot{I}_2 = \frac{\dot{V}_2 - \dot{V}_o}{\dot{Z}_1}$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_3 + \dot{I}_4 + \dot{I}_5 + \dot{I}_6 \quad (3)$$

$$\dot{I}_3 + \dot{I}_4 = \dot{I}_o = \frac{\dot{V}_o}{\dot{Z}_o}, \dot{I}_5 = \dot{I}_6 = \frac{\dot{V}_o}{\dot{Z}_2}$$

식 (3)으로부터,

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \frac{\dot{V}_1 + \dot{V}_2 - 2\dot{V}_o}{\dot{Z}_1} = \dot{V}_o \left(\frac{1}{\dot{Z}_o} + \frac{2}{\dot{Z}_2} \right) \quad (4)$$

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_2 = \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{\dot{Z}_1} \quad (5)$$

식(4)~(5)로부터, UPS1, 2의 출력 전류는 다음과 같다.

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{2(R + j\omega L)} + \frac{\dot{V}_o}{2} \left(\frac{1}{R_o + j\omega L_o} + 2j\omega C \right) \quad (6)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{-(\dot{V}_1 - \dot{V}_2)}{2(R + j\omega L)} + \frac{\dot{V}_o}{2} \left(\frac{1}{R_o + j\omega L_o} + 2j\omega C \right) \quad (7)$$

그리고, UPS1,2의 출력 전압의 크기와 위상 차를 각각 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta V = V_1 - V_2 \quad (8)$$

$$\Delta \phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (9)$$

부하에서 UPS1,2의 출력 전류에 의한 피상 전력

을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_1 = \dot{V}_o \dot{I}_1^* \quad (10)$$

$$S_2 = \dot{V}_o \dot{I}_2^* \quad (11)$$

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (12)$$

순환 전류에 의한 복소 전력을 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta S = \frac{V_o \{ V_1 (\cos \phi_1 - j \sin \phi_1) - V_2 (\cos \phi_2 - j \sin \phi_2) \}}{R - j\omega L} \quad (13)$$

UPS 각각의 출력 전압을 비교하면 다음과 같이, 3가지의 경우를 살펴볼 수 있다.

A. $V_1 = V_2 = V$ & $\phi_1 = \phi_2 = \phi$

주어진 조건을 식(13)에 대입하면,

$$\Delta S = \frac{V_o \{ V (\cos \phi - j \sin \phi) - V (\cos \phi - j \sin \phi) \}}{R - j\omega L} = 0 \quad (14)$$

식(14)와 같이, 전압의 크기와 위상이 같다면, 순환 전류에 의한 복소 전력은 나타나지 않는다.

B. $V_1 \neq V_2$ & $\phi_1 = \phi_2 = \phi$

주어진 조건을 식(13)에 대입하면,

$$\Delta S = \frac{V_o (V_1 - V_2) (\cos \phi - j \sin \phi)}{R - j\omega L} \cong \Delta Q \quad (15)$$

식(15)와 같이 두 UPS간의 출력 전압의 크기가 다르다면, 순환 무효전력이 발생하는 것을 알 수 있다.

C. $V_1 = V_2 = V$ & $\phi_1 \neq \phi_2$

주어진 조건을 식(13)에 대입하면,

$$\Delta S = \frac{V_o V \{ (\cos \phi_1 - j \sin \phi_1) - (\cos \phi_2 - j \sin \phi_2) \}}{R - j\omega L} \cong \Delta P \quad (16)$$

식 (16)에서처럼, 두 UPS간의 출력 전압의 위상 차가 있으면, 순환 유효 전력이 발생하는 것을 알 수 있다.

3. 제안된 제어기법

3.1 Master UPS

Master UPS는 출력 전압을 일정하게 제어한다. 그 구

성은 전압 제어기와 전류 제어기로 구성되어 있다. master UPS의 제어 블록도를 그림 2에 나타내었다.

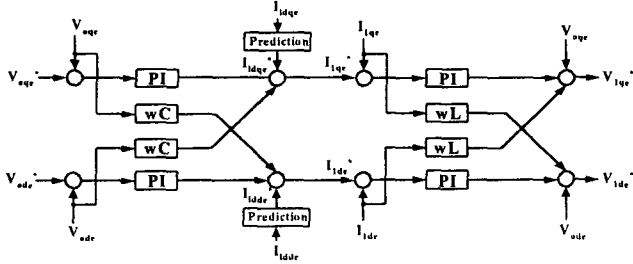


그림 2 Master UPS 제어블럭도
Fig. 2 Block diagram of the control scheme for the Master UPS

먼저, 전압 제어기에서 출력 기준 전압을 다음과 같이 정의한다.

$$V_o^* = \begin{bmatrix} V_{oa}^* \\ V_{ob}^* \\ V_{oc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -E \sin \omega t \\ -E \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ -E \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (17)$$

이 출력 기준 전압을 동기 회전 좌표축에 변환하면 식 (17)에서와 같이 일정한 값이 된다.

$$\hat{V}_o^* = CV_o^* = \begin{bmatrix} V_{oqe}^* \\ V_{ode}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

where, $C = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$

전압 제어기는 출력 전압 V_o 를 출력 기준 전압 V_o^* 와 비교해서, 여기서 발생한 오차를 0이 되도록 제어한다. 또한, 부하 변동의 동적인 특성을 개선하기 위해서 부하 전류를 예측한다.^[5]

전압 제어기에서의 출력 기준 전류는 다음과 같다.

$$I_{1qe}^* = I_{ldqe}^* + K_{PI}(V_{oqe}^* - V_{oqe}) + \omega CV_{ode} \quad (19)$$

$$I_{1de}^* = I_{ldde}^* + K_{PI}(V_{ode}^* - V_{ode}) - \omega CV_{oqe} \quad (20)$$

또한, 부하 전류 예측은 다음식으로 계산된다.

$$I_{ld}^* = 2I_{ld}(k) - I_{ld}(k-1) \quad (21)$$

$$I_{ld}^* = 3[I_{ld}(k) - I_{ld}(k-1) + I_{ld}(k-2)] \quad (22)$$

전압 제어기와 마찬가지로, 전류 제어기는 Master UPS의 출력 전류 I_1 과 전압 제어기의 출력 I_1^* 을 비교해

서 발생한 오차를 PI제어기로 보상한다. 결국, 보상된 값과 출력 전압을 더해서 Master UPS의 기준 전압 V_1^* 을 만들어낸다.

이 기준 전압은 다음식(23)~(24)와 같다.

$$V_{1qe}^* = V_{oqe}^* + K_{PI}(I_{1qe}^* - I_{1qe}) + \omega LI_{1de} \quad (23)$$

$$V_{1de}^* = V_{ode}^* + K_{PI}(I_{1de}^* - I_{1de}) - \omega LI_{1qe} \quad (24)$$

3.2 Slave UPS

앞에서 언급했듯이, Slave UPS도 Master UPS처럼 전압 제어를 하면, 각 UPS 출력 전압의 크기와 위상 차에 의한 순환 전류가 발생한다. 그러므로, Slave UPS는 전류 제어만 수행한다. Slave UPS의 제어 블록도를 그림3에 나타내었다.

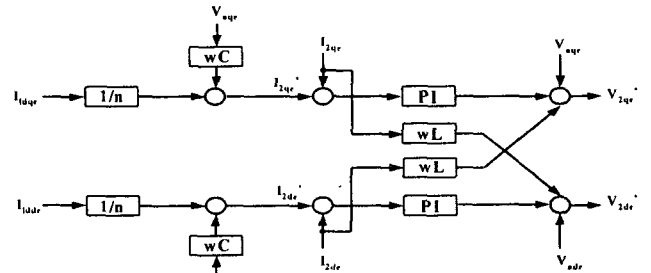


그림 3 Slave UPS 제어블럭도
Fig. 3 Block diagram of the control scheme for the Slave UPS

기준 전류를 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$I_{2qe}^* = \frac{I_{ldqe}}{n} - \omega CV_{oqe} \quad (25)$$

$$I_{2de}^* = \frac{I_{ldde}}{n} - \omega CV_{ode} \quad (26)$$

전류 제어기는 Slave UPS의 전류 I_2 와 기준 전류 I_2^* 를 비교해서 발생한 오차를 PI제어기로 보상한다. 결국, 보상된 값과 출력 전압을 더해서 Slave UPS의 기준 전압 V_2^* 를 만들어낸다.

이 기준 전압은 다음 식(27)~(28)과 같다.

$$V_{2qe}^* = V_{oqe}^* + K_{PI}(I_{2qe}^* - I_{2qe}) + \omega LI_{2de} \quad (27)$$

$$V_{2de}^* = V_{ode}^* + K_{PI}(I_{2de}^* - I_{2de}) - \omega LI_{2qe} \quad (28)$$

그러나, Master UPS 고장 발생시, Slave UPS가 전류 제어모드에서 전압 제어 모드로 전환하여, 출력 전압을 일정하게 유지시킨다.

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 연구를 위해 ACSL을 사용하였다. 그림 4는 시뮬레이션에 사용된 주 회로이다. 그리고, 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 1과 같다.

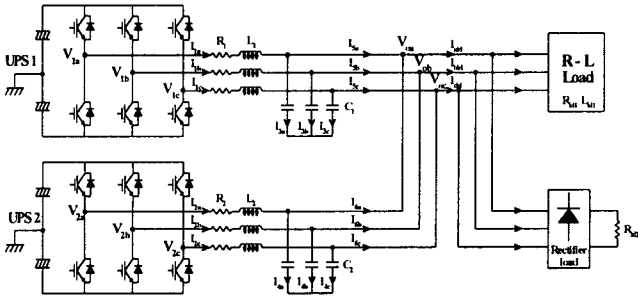


그림4 주회로의 구성
Fig. 4 Main circuit configuration

표1 시스템 파라미터

Parameters	Value
입력전압	220[V], 60[Hz]
DC-link 전압	400[V]
R_1, R_2	0.08[Ω]
L_1, L_2	0.25[mH]
C_1, C_2	60[μF]
R-L 부하	3.87[Ω], 7.7[mH]
정류기부하	8.82[Ω]

그림 5는 100% R-L부하(p.f=0.8) 인가시의 출력 전압, 부하 전류, UPS1 및 UPS2 출력 전류를 나타낸다. UPS1이 단독운전 중에, T=0.4[sec]에서 UPS2를 연결하여 병렬 운전을 수행하였다. 그림에서와 같이, 부하 전류를 각각의 UPS가 부담하고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 100% 정류기 부하 인가시의 출력 전압, 부하 전류, UPS1 및 UPS2 출력 전류를 나타낸다. 마찬가지로, UPS1이 단독으로 운전하고 있다가, T=0.4[sec]에서 UPS2를 연결하여 병렬 운전을 수행하였다. 본 논문에서 제안한 알고리즘으로 선형 부하뿐만 아니라 비선형 부하에서도 훌륭한 부하 분담 특성을 보여준다.

그림 7은 부하의 변동에 따른 특성을 보여준다. 100% 정류기 부하를 인가하고 병렬 운전을 하다가, T=0.4[sec]에서 200%정류기 부하를 인가하였을 때의 출력 파형을 나타낸다.

그림 8은 병렬운전을 하고 있다가, T=0.4[sec]에서 UPS1이 고장이 발생하였을 때의 출력 전압, 부하 전류, UPS1 및 UPS2의 출력 전류를 나타낸다.

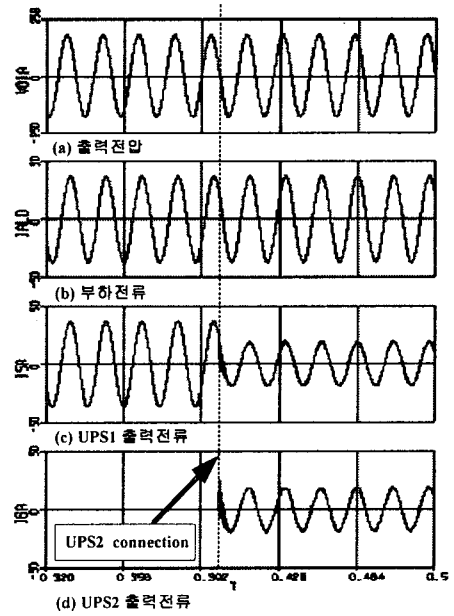


그림 5 100%R-L 부하시 (p.f=0.8)
Fig. 5 Simulation results at 100% R-L load (p.f=0.8)

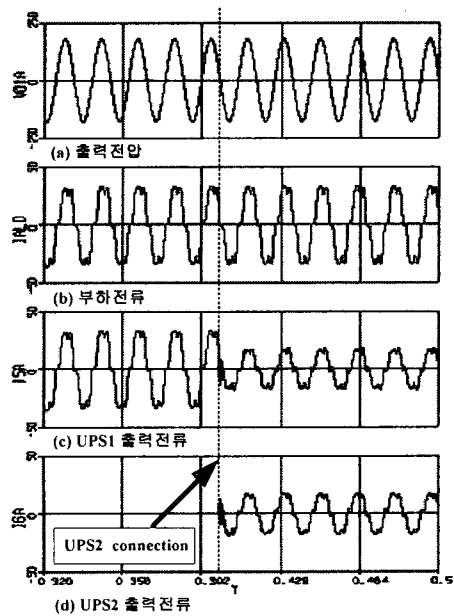
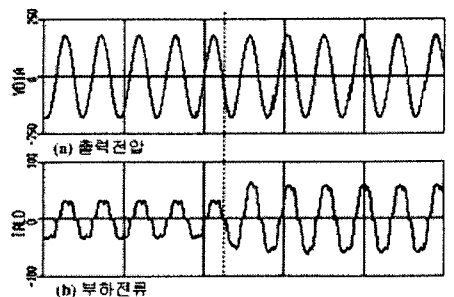


그림 6 100%정류기 부하시
Fig. 6 Simulation results at 100% Rectifier load



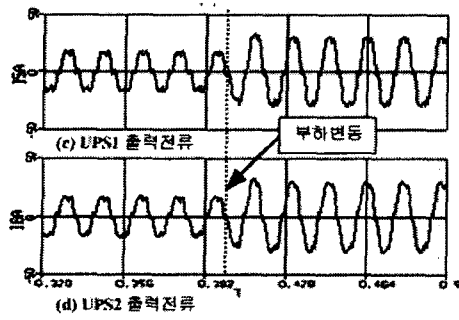


그림 7 부하급변시 출력파형
100% 부하 → 200% 부하
Fig. 7 Simulation results at load variation
(100% → 200%)

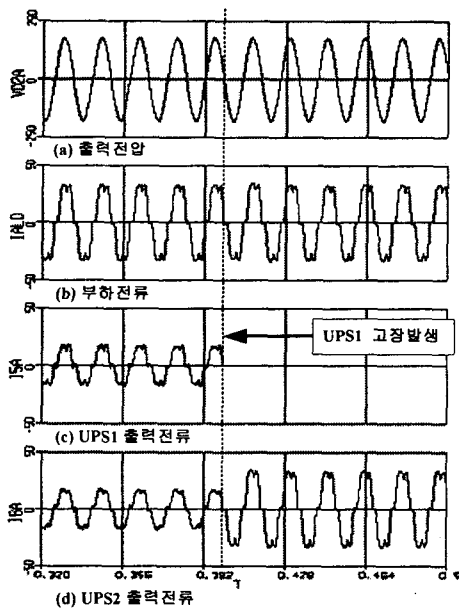


그림 8 병렬운전중 UPS1 고장시
Fig. 8 Simulation results at breaking
down of UPS1 while UPS1 and
UPS2 are operating

5. 결 론

본 논문에서는 UPS 시스템의 병렬 운전 제어 기법에 대해 서술하였다. UPS 병렬 운전의 회로를 수학적 모델로 표현하였다. 병렬 운전시, 출력전압에 의한 순환 전류를 제거하기 위해 새로운 제어 알고리즘이 제안되었다.

제안된 제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 훌륭한 부하 분담 특성과 빠른 동적 응답 특성을 보여 주었다. 기본적인 결과를 얻었지만 앞으로 실험에 연관된 연구가 이루어질 것이다.

참 고 문 헌

[1] S. Tamai, M. Kinoshita, "Parallel operation of digital controlled UPS system", Industrial

Electronics, Control and Instrumentation, Proceedings IECON '91., 1991 International Conference on, 1991 vol. 1, pp. 326-332, 1991.

- [2] D. Shanxu, M. Yu, X. Jian, K. Young, and C. Jian, "Parallel operation control technique of voltage source inverters in UPS", Power Electronics and Drive Systems, 1999.PEDS '99. Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on , vol. 2, pp. 883-887, 1999.
- [3] A. Tuladhar, H. Jin, T. Uger, and K. Mauch, "Control of parallel inverters in distributed ac power systems with consideration of the line impedance effect", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998. APEC '98. Conference Proceedings, Thirteenth Annual, vol. 1, pp. 321-328, 1998.
- [4] T.G. Koo, Y.B. Byun, K.Y. Joe, J.I. Seo, D.H. Kim, and C.U. Kim, "Wireless parallel operation control of a two-module UPS system for equivalent load sharing", Industrial Electronics Society, IECON '2000, vol. 4, pp. 2291- 2296, 2000.
- [5] J.H. Choi and B.J. Kim, "Improved digital control scheme of three phase UPS inverter using double control strategy", APEC '97, Conference Proceedings, vol. 2, pp. 820-824, 1997.
- [6] T. Kawabata and S. Higashino, "Parallel operation of voltage source inverters", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 24, no. 2, pp. 281-287, Mar/Apr 1988.
- [7] J. Holtz and K.H. Werner, "Multi-Inverter UPS system with redundant load sharing control", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 37 Issue. 6, pp. 506-513, Dec. 1990.
- [8] J.F. Chen and C.L. Chu, "Combination voltage-controlled and current- controlled PWM inverter for UPS parallel operation", Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 10 Issue.5, pp. 547-558, Sept. 1995.
- [9] A. Tuladhar, H. Jin, T. Unger and K. Mauch, "Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1997. APEC '97 Conference Proceedings, Twelfth Annual, vol. 1, pp. 94-100, 1997.
- [10] Yan Xing, Lipei Huang, S. Sun, and Yangguang Yan, "Novel control for redundant parallel UPSs with instantaneous current sharing", Power Conversion Conference, PCC-Osaka 2002. Proceedings of the, vol. 3, pp. 959-963, 2002.
- [11] B.J. Kim, J.H. Choi, J.S. Kim and C.H. Choi, "Digital control scheme of UPS inverter to improve the dynamic response", Electrical and Computer Engineering, 1996. Canadian Conference on , vol. 1, pp. 318-321, 1996.